



## 後進波モード厚み振動のエネルギー閉込めに関する研究

著者	山田 顕
号	702
発行年	1978
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9438">http://hdl.handle.net/10097/9438</a>

氏 名	やま だ けん 山 田 顕
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 54 年 3 月 27 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	後進波モード厚み振動のエネルギー閉込めに関する 研究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 清 水 洋
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 清 水 洋 東 北 大 学 教 授 柴 山 乾 夫 東 北 大 学 教 授 御 子 柴 宣 夫 東 北 大 学 教 授 池 田 拓 郎 東 北 大 学 助 教 授 中 村 信 良

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

近年、高周波回路の集積化に伴い、小形で高性能の共振子やフィルタが強く要求され、固体中の弾性振動を利用した機能デバイスへの関心が高まっている。なかでも、圧電板の厚み振動におけるエネルギー閉込め現象がSchockleyらにより報告されて以来、エネルギー閉込め型の圧電共振子や圧電モノリシック・フィルタは、高周波帯域用の素子として注目され、各方面で活発に研究が行われてきた。

圧電板の厚み振動には、板に沿って伝搬する波の位相速度と群速度が同一方向となる前進波モードと、それらが互いに逆方向となる後進波モードとがあるが、これまでは、専ら前進波モードの厚み振動についてエネルギー閉込めの研究がなされてきた。このため、従来行われてきたエネルギー閉込めの手法は、前進波モード厚み振動のみにその適用範囲が限られ、後進波モードの厚み振動に対しては適用できない。

厚み振動のうち、後進波モードとなるものは少なくないが、そのエネルギー閉込めに関しては、一、二の報告があるだけで、これまで殆ど研究されていなかった。また、すでに報告されている閉込めの手法も、圧電板を機械的に加工することにより、その板厚を部分的に薄くするもので、実用上の観点からは、より簡便な閉込め法の開発が望まれていた。

本論文は、後進波モード厚み振動に対するエネルギー閉込めの問題を追求し、圧電反作用の効果のみを用いた新しい簡便な閉込めの手法を提案するとともに、その閉込めの機構や特徴を、等価回路を用いた解析により明らかにするものである。

## 第2章 後進波モード厚み振動と周波数上昇型エネルギー閉込め

厚み振動の分散曲線とエネルギー閉込めとの間には密接な関係がある。本章では、この関係を明確にするとともに、エネルギー閉込めの実現条件に新たな一般的表現を与えている。

前進波モード厚み振動の分散曲線は、図1(a)に示すように、しゃ断周波数より低い周波数領域で伝搬定数が虚数、すなわち低域しゃ断型となり、閉込めは普通の周波数低下型になる。これに対し、後進波モードの厚み振動では、しゃ断周波数より高い周波数領域で伝搬定数が虚数になり、分散曲線は図1(b)に示すような高域しゃ断型となる。この場合の閉込めは周波数上昇型であり、普通の場合とは逆に、閉込め部分のしゃ断周波数を周辺部分のしゃ断周波数よりも高くしたときに閉込めが実現される。

従来は、伝搬定数が閉込め部分で実数、周辺部分で虚数となることがエネルギー閉込めの実現条件であるとされてきた。しかし、従来の考え方からは、反共振周波数付近での閉込めモードの形成が説明しにくい。そこでここでは、周辺部分の伝搬定数が虚数となる範囲を閉込め可能の周波数領域とする、閉込めの実現条件に対する新しい、より適切な表現を与え、エネルギー閉込めの問題を考えるうえでの基礎としている。

## 第3章 圧電反作用の制御による周波数上昇型エネルギー閉込め

周波数上昇型のエネルギー閉込めを実現するには、何らかの方法により、閉込め部分のしゃ断周波数を上昇させてやる必要がある。これまでに、閉込め部分の板厚を局部的に薄くする手法が報告されているが、このような周波数上昇型の閉込めを、板厚を変えずに実現できれば都合がよい。

本章では、圧電反作用の効果のみを用い、板厚を一樣としたまま周波数上昇型の閉込めを実現する新しい手法を提案し、その有効性を実験により検証している。これらは、圧電板に直列容量を付加するか、電極をすだれ状にすることによって圧電反作用が制御され、しゃ断周波数が上昇することを利用したもので、(i) 周辺部分を未分極とするか、周辺部分を電氣的に短絡したうえで電氣端子に直列容量を付加する方法（部分分極方式ならびに周辺部短絡方式）、および(ii) 周辺部分を未分極とするか、周辺部分を電氣的に短絡したうえで、閉込め部分の電極をすだれ状にする方法である。

一例として、図2のような周辺部短絡方式の電極構成による $\text{PbTiO}_3$ 磁器板基本厚みたて振動共振子の電氣端子アドミタンス特性を図3に示す。

本章ではさらに、周波数低下型と周波数上昇型の両エネルギー閉込めについて、それぞれの特徴を比較考察し、周波数低下型は共振主導型、また周波数上昇型は反共振主導型の閉込めであることを指摘した。

## 第4章 周波数上昇型エネルギー閉込めの分布定数等価回路解析

周波数上昇型エネルギー閉込めは反共振主導型の閉込めであり、閉込めモードの反共振の動きが特に注目される。また、電極に直列に付加する静電容量が、閉込めモードの形成に重要な役割を果たすことから、その解析には電気端子を含む六端子の分布定数等価回路を用いることが望ましい。

本章では、まず、板に沿って伝搬する厚み振動モードの分布定数等価回路を、後進波モードの場合にも適用できるよう一般的に拡張した。次に、この分布定数等価回路を用いて $\text{PbTiO}_3$ 磁器板基本厚みたて振動のエネルギー閉込めの解析を行ない、周波数上昇型エネルギー閉込めの各方式について閉込めモードの周波数スペクトラムや変位分布などを求めている。

この等価回路解析により、周波数上昇型エネルギー閉込めの機構が解明され、新たにいくつかの特徴が明らかになった。たとえば部分分極方式の場合、閉込めモードの変位分布が双曲線関数形となり、電極幅を広くしても非調和振動が生じないことである。これは従来の閉込めには見られない大きな特徴である。また、周辺部短絡方式では無電極のギャップ部分が閉込めモードの形成に大きく関与することも、定性的な考察からは予想されなかったことである。さらに、板厚を局部的に薄くする方式については、閉込め部分と周辺部分の板厚の比とエネルギー閉込めの関係も明らかにされ、周波数上昇型エネルギー閉込めの概要がほぼ解明されている。

## 第5章 横効果厚みたて振動のエネルギー閉込め

板面に平行な電界で励振される厚み振動のうち、横効果厚みたて振動については、いままでこれを回路素子として利用する試みがなされていなかった。横効果厚みたて振動が利用できれば高周波帯域用の共振子として有望であると考えられることから、本章ではその積極的な利用に着目し、エネルギー閉込めの可能性について検討している。

まず、横効果厚み振動が励振される面内分極圧電磁器板について、厚み振動の分散曲線を計算し、基本厚みたて振動では後進波モードとなる場合が多く、分散曲線が高域しゃ断型となることを明らかにしている。

平行電界励振の厚み振動子では、波を励振する部分が無電極となる。このため、平行電界励振基本厚みすべり振動のように閉込めが周波数低下型となる場合、無電極の励振部分に波のエネルギーを閉込めるには、ここに絶縁物等の負荷質量を付加し、そのしゃ断周波数を下げてやる必要がある。これに対し、横効果基本厚みたて振動では、分散曲線が高域しゃ断型で閉込めが周波数上昇型になることから、本章では、圧電板上に図4に示すような電極を設け、その質量負荷効果等を利用して相対向する帯状の電極間に閉込めを実現する手法を提案し、その有効性を実験により確かめている。

## 第6章 周波数上昇型エネルギー閉込めモードを用いたフィルタ

周波数上昇型の閉込めは反共振主導型の閉込めであり、共振よりもむしろ反共振付近で良好な閉込めが実現される。そこで本章では、周波数上昇型エネルギー閉込めの応用として、閉込めモー

ドの反共振を積極的に利用したフィルタの構成例を示している。

反共振を主体に構成するフィルタとして、ここでは2個の独立なエネルギー閉込め型共振子を静電容量で結合した $\pi$ 形フィルタ、および斜対称モードと対称モードの各反共振周波数間を通過域とした二重モードフィルタについて検討し、いずれの場合にも高いインピーダンスを有するフィルタが得られることを明らかにした。

$\pi$ 形フィルタについては、集中定数等価回路および分布定数等価回路を用いてフィルタ特性の計算を行ない、これらが実験値と良く一致することを確認している。また、二重モードフィルタに関しては、周辺部短絡方式による実験結果を示すとともに、部分分極方式について分布定数等価回路による解析を行なった。この解析により、周波数上昇型エネルギー閉込めでは斜対称モードの方が対称モードよりも周波数が低くなることや、通過域よりも低い周波数領域でフィルタの減衰量が低下することなど、従来の二重モードフィルタとの相違点が明らかにされている。

## 第7章 結 論

本章では、各章の内容を要約し、結論としてまとめている。

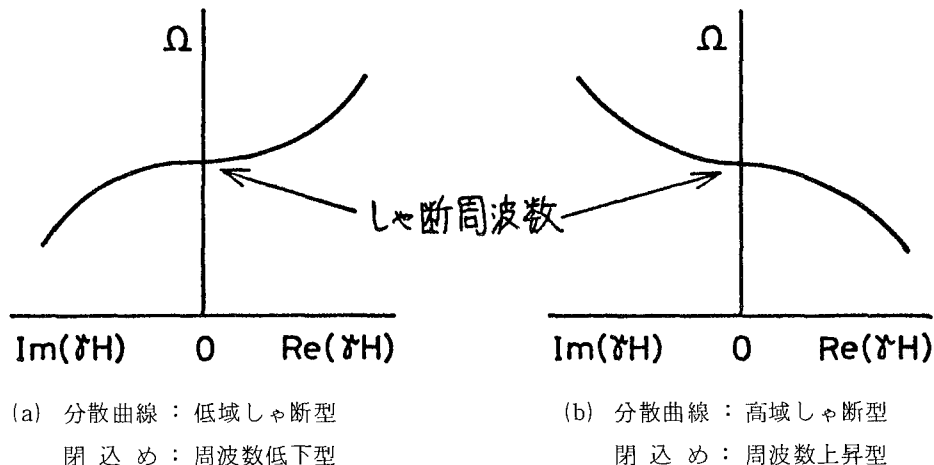


図1 分散曲線とエネルギー閉込め

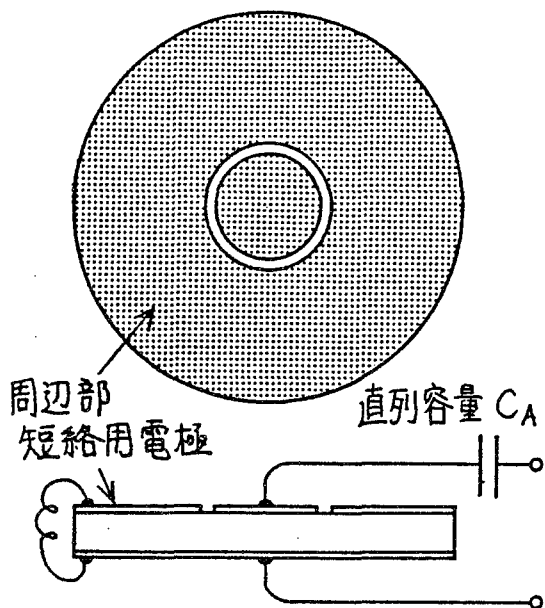


図2 周辺部短絡方式の共振子構成

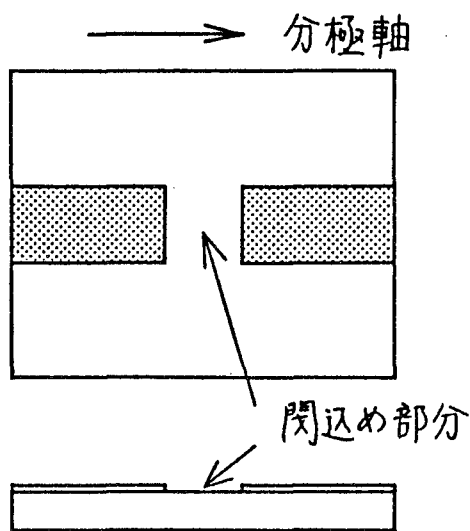


図4 横効果基本厚みたて振動エネルギー閉込め型共振子の構造

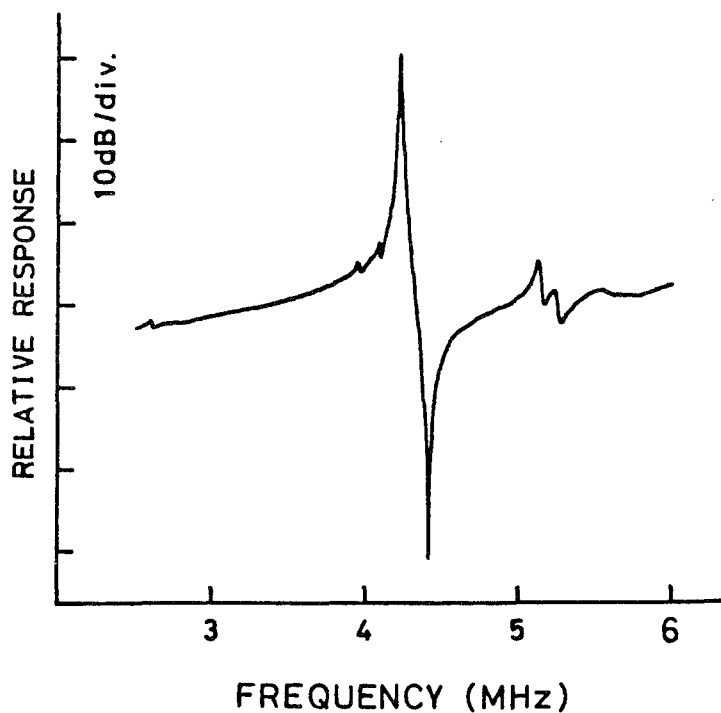


図3 周辺部短絡方式による $\text{PbTiO}_3$ 磁器板基本厚みたて振動アドミタンス特性

## 審 査 結 果 の 要 旨

圧電板の厚み振動におけるエネルギー閉込め現象とその共振子やフィルタへの応用に関しては、これまでに数多くの研究がなされてきた。しかし、板面に沿う伝搬の位相速度と群速度が互に逆方向となる後進波モード厚み振動に対しては、従来行われてきた前進波モード厚み振動に対するエネルギー閉込めの手法は適用できない。著者は、後進波モード厚み振動に対するエネルギー閉込めの問題を追求し、新しい簡便な閉込め法を提案すると共に、その閉込めの機構や特徴を究明した。本論文はその成果をまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では、厚み振動が前進波モードと後進波モードに分けられ、これに対応してエネルギー閉込めがそれぞれ周波数低下型および周波数上昇型の2つの型に分かれることを、分散曲線を用いて説明している。また、エネルギー閉込めの実現条件に対して、従来とは異なるより適切な表現を与えている。

第3章では、質量負荷効果を用いずに、圧電反作用の制御だけによって周波数上昇型エネルギー閉込めを実現する新しい方法を提案し、その有効性を実験的に検証している。これは有用な新しい知見である。

第4章では、板面に沿う厚み振動の伝搬を表わす分布定数等価回路を、後進波モードの場合にも適用できるように拡張して、周波数上昇型エネルギー閉込めの等価回路解析を初めて可能にし、詳細な数値解析を行っている。これにより、閉込めの機構が解明されると共に、従来の閉込めには見られない周波数上昇型閉込めの種々の特徴（非調和振動が生じない場合があることなど）が明らかにされた。これらは重要な成果である。

第5章では、従来利用されていなかった横効果励振厚みたて振動の積極的利用に着目し、エネルギー閉込めの可能性を検討している。分散曲線の計算結果から、横効果励振の基本厚みたて振動では後進波モードとなる場合が多いことを指摘し、これに対して新しい興味ある閉込め法を提案し、その有効性を実験で確かめている。

第6章では、周波数上昇型エネルギー閉込めのフィルタへの応用を追求し、二三のフィルタ構成例およびその特性の計算結果と実測結果を示し、応用の可能性を検証している。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文はこれまで殆ど研究されていなかった後進波モード厚み振動のエネルギー閉込めについて、簡便な閉込め法と特性解析法を開拓し、閉込めの機構および特徴を解明すると共に、フィルタへの応用の可能性を検証したもので、通信工学、電気音響工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。